

Adriano Siqueira Pylro

**Modelo Linear Dinâmico de Harrison & Stevens Aplicado
ao Controle Estatístico de Processos Autocorrelacionados**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Eugenio Kahn Epprecht

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2008



Adriano Siqueira Pylro

Modelo Linear Dinâmico de Harrison & Stevens Aplicado ao Controle Estatístico de Processos Autocorrelacionados

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eugenio Kahn Epprecht

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Reinaldo Castro Souza

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Flávio Sanson Fogliatto

UFRGS

Prof. Maysa Sacramento de Magalhães

ENCE/IBGE

Prof. Linda Lee Ho

Poli-USP

Prof. Jose Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de fevereiro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Adriano Siqueira Pylro

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Espírito Santo em 1993 e Mestre em Engenharia de Produção pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 1996.

Ficha Catalográfica

Pylro, Adriano Siqueira

Modelo linear dinâmico de Harrison & Stevens aplicado ao controle estatístico de processos autocorrelacionados / Adriano Siqueira Pylro ; orientador: Eugenio Kahn Epprecht. – 2008.

113 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Industrial)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Gráficos de controle. 3. Controle estatístico de processo (CEP). 4. Autocorrelação. 5. Previsão bayesiana. 6. Modelo linear dinâmico. I. Epprecht, Eugenio Kahn. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

À minha família, Simone, Lucas e
Mateus, por todo apoio, amor e confiança de
você. Amo vocês.

Aos meus pais, Sylvio e Maria José,
por ter me oferecido todas as oportunidades
para aqui poder chegar. Obrigado.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Simone, minha esposa, por ter confiado em um doido como eu, pelo apoio em todos os momentos e, principalmente, pelo seu amor.

Aos meus filhos Lucas e Mateus, pois conseguiram entender a importância do esforço do seu pai em todos esses anos de doutorado.

Aos meu pais, pois sem eles eu não teria como chegar até aqui.

Ao meu orientador, Professor Eugenio K. Epprecht, pela confiança que depositou em mim e por muitas vezes ter segurado a pressão em meu favor.

Ao DEI e em especial à Cláudia que me ajudou muito na questões logísticas e burocráticas do curso e ao saudoso João, cuja vida se foi em um piscar de olhos.

À CAPES e à PUC-Rio pelo apoio financeiro.

À UNIVIX por ter tornado viável eu cumprir o período de créditos do curso de doutorado.

Finalmente, mas o mais importante agradecimento, à Deus, pois estou certo que nenhum dos Teus planos pode ser frustrado.

Resumo

Pylro, Adriano S.; Epprecht, Eugenio K. **Modelo Linear Dinâmico de Harrison & Stevens Aplicado ao Controle Estatístico de Processos Autocorrelacionados**. Rio de Janeiro, 2008. 113p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos principais problemas em manufatura é como ajustar um processo de produção que não está obtendo uma performance desejada. O intuito é fazer com que o parâmetro do processo volte a assumir um valor alvo requerido. As técnicas de controle estatístico de processo (CEP) são amplamente utilizadas na indústria para monitorar processos e, conseqüentemente, para melhoria da qualidade. Os gráficos de controle para variáveis mais freqüentemente utilizados para monitorar a média e a variabilidade do processo são os gráficos de Shewhart, os gráficos de CUSUM e os gráficos de EWMA. Porém, as considerações básicas para se utilizar um gráfico de Shewhart são que os dados gerados pelo processo sejam independentes e identicamente distribuídos (IID). Quando a hipótese de independência dos dados não é satisfeita, tais gráficos não funcionam bem, pois fornecerão resultados não confiáveis na forma de excesso de alarme falsos, ou seja, conduz a interpretações equivocadas acerca do processo e gera custos adicionais de controle. Esta tese utiliza uma formulação bayesiana, o Modelo Linear Dinâmico de Harrison & Stevens (MLD-HS) para o monitoramento da média de processos cujas observações podem ser modeladas como um processo ARMA (1,1). O Fator de Bayes acumulado foi utilizado na detecção de desvios na média de um dado processo. Posteriormente, os resultados obtidos pelo modelo proposto, que foi nomeado como MLD-CEP, são comparados aos resultados obtidos por Lu & Reynolds (2001). Os resultados obtidos pelo MLD-CEP sugerem bom desempenho na detecção de alterações na média em processos de baixo a moderadamente alto nível de autocorrelação.

Palavras-chave

Gráficos de controle; controle estatístico de processo (CEP); autocorrelação; previsão bayesiana; Modelo Linear Dinâmico.

Abstract

Pylro, Adriano S.; Epprecht, Eugenio K. **Dynamic Linear Model of Harrison & Stevens Applied to Statistical Process Control Autocorrelated**. Rio de Janeiro, 2008. 113p. D.Sc Thesis – Departamento de Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Monitoring a manufacturing process is an important subject in the industries currently. Statistical process control techniques are widely used for process monitoring and quality improvement. Control charts for variables more often used to control both process mean and variance are Shewhart control charts, CUSUM charts and EWMA charts. However, the basic assumptions to use a Shewhart chart are: independent and identically distributed observations (IID); but, autocorrelation may be present in many process, and may have a strong impact in the properties of control charts. This thesis used a bayesian formulation, Dynamic Linear Model of Harrison & Stevens (MLD-HS), for monitoring the process mean for the situation in which observations from the process can be modeled as an ARMA(1,1). The cumulative Bayes factor has been used for detecting shifts on the process mean. After that, the results obtained by MLD-CEP are compared with the results obtained by Lu & Reynolds (2001). The MLD-CEP results indicate a good performance in detecting shifts in the process mean.

Keywords

Control charts; statistical process control (SPC); autocorrelation; bayesian forecast; Dynamic Linear Model.

Sumário

1	Introdução	17
2	Controle Estatístico de Processos	21
2.1.	Gráficos de Controle de Shewhart	21
2.2.	Gráficos de Controle EWMA	25
2.3.	Gráficos de Controle de CUSUM	26
2.4.	Subgrupos Racionais	27
2.5.	Controle Estatístico de Processos com Observações Autocorrelacionadas	28
2.6.	Principais Abordagens para CEP de processos autocorrelacionados	32
3	Fundamentação Teórica de Modelos Bayesianos de Previsão	37
3.1.	Abordagem Bayesiana para Estimação	37
3.2.	Abordagem Bayesiana para Previsão	38
3.3.	Características Fundamentais dos Modelos Bayesianos de Previsão de Harrison & Stevens (HS)	39
3.4.	Modelo Linear Dinâmico – MLD	40
3.5.	Fator de Bayes	49
4	Modelo Estacionário para o CEP Autocorrelacionados	51
4.1.	O Processo AR(1) com Erro Aleatório Adicional	51
4.2.	MLD-CEP	54
4.3.	Suposições e Opções do Modelo Proposto – MLD-CEP	54
4.4.	Obtenção dos <i>Designs</i> para o Modelo Proposto – MLD-CEP	55
4.5.	Análise de desempenho do MLD-CEP para cada <i>design</i>	59
5	Conclusão	70

6 Referências Bibliográficas 73

7 Apêndice 78

Lista de figuras

Figura 1 – observações não correlatadas	28
Figura 2 – observações autocorrelatadas negativamente	28
Figura 3 – observações autocorrelatadas positivamente	29
Figura 4 – processo não estacionário	29
Figura 5 - um processo com comportamento do modelo estático.	43
Figura 6 - um processo com comportamento do modelo estacionário.	44

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação dos Modelos Bayesianos (HS) com Modelos Tradicionais (MT)	40
Tabela 2 - Fatores de Desconto	46
Tabela 3 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,4 / 0,5 / 0,5)$	56
Tabela 4 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,4 / 0,5 / 0,5)$	57
Tabela 5 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,4 / 0,5 / 0,5)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	58
Tabela 6 - Valores obtidos pelo MLD-CEP e comparados ($\phi = 0,4$ e $\psi = 0,5$)	61
Tabela 7 - Valores obtidos pelo MLD-CEP e comparados ($\phi = 0,8$ e $\psi = 0,5$)	62
Tabela 8 - Valores obtidos pelo MLD-CEP e comparados ($\phi = 0,4$ e $\psi = 0,9$)	63
Tabela 9 - Valores obtidos pelo MLD-CEP e comparados ($\phi = 0,8$ e $\psi = 0,9$)	64
Tabela 10 - Valores obtidos pelo MLD-CEP e comparados ($\phi = 0,4$ e $\psi = 0,5$) – II	65
Tabela 11 - Valores obtidos pelo MLD-CEP e comparados ($\phi = 0,4$ e $\psi = 0,9$) – II	66
Tabela 12 - Valores obtidos pelo MLD-CEP e comparados ($\phi = 0,8$ e $\psi = 0,5$) – II	67
Tabela 13 - Valores obtidos pelo MLD-CEP e comparados ($\phi = 0,8$ e $\psi = 0,9$) – II	68
Tabela 14 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,4 / 0,5 / 1,0)$	84
Tabela 15 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,4 / 0,5 / 1,0)$	84

Tabela 16 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,4 / 0,5 / 1,0)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	85
Tabela 17 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,4 / 0,5 / 2,0)$	87
Tabela 18 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,4 / 0,5 / 2,0)$	87
Tabela 19 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,4 / 0,5 / 2,0)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	88
Tabela 20 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,4 / 0,9 / 0,5)$	89
Tabela 21 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,4 / 0,9 / 0,5)$	89
Tabela 22 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,4 / 0,9 / 0,5)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	91
Tabela 23 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,4 / 0,9 / 1,0)$	91
Tabela 24 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,4 / 0,9 / 1,0)$	92
Tabela 25 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,4 / 0,9 / 1,0)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	93
Tabela 26 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,4 / 0,9 / 2,0)$	94
Tabela 27 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,4 / 0,9 / 2,0)$	94
Tabela 28 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,4 / 0,9 / 2,0)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	98
Tabela 29 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,5 / 0,5)$	98

Tabela 30 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,5 / 0,5)$	99
Tabela 31 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,5 / 0,5)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	100
Tabela 32 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,5 / 1,0)$	101
Tabela 33 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,5 / 1,0)$	101
Tabela 34 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,5 / 1,0)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	102
Tabela 35 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,5 / 2,0)$	102
Tabela 36 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,5 / 2,0)$	103
Tabela 37 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,5 / 2,0)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	104
Tabela 38 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,9 / 0,5)$	105
Tabela 39 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,9 / 0,5)$	105
Tabela 40 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,9 / 0,5)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	106
Tabela 41 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,9 / 1,0)$	107
Tabela 42 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,9 / 1,0)$	107
Tabela 43 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,9 / 1,0)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	109

Tabela 44 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ sem refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,9 / 2,0)$	109
Tabela 45 - Obtenção do $\overline{alarmes} = 7,45$ com refino para $(\phi, \psi, \delta^*) = (0,8 / 0,9 / 2,0)$	110
Tabela 46 - (β, τ) para $(\phi, \psi, \delta^*) =$ $(0,8 / 0,9 / 2,0)$ e $\overline{alarmes} = 7,45 \Rightarrow NMA_0 \cong 370$	111